

# Caractérisation expérimentale d'un écoulement en conduite circulaire avec swirl

H. BAUDUIN<sup>a</sup>, L. KEIRSBULCK<sup>a</sup>, S. LALOT<sup>a</sup>, L. LABRAGA<sup>a</sup>

a. TEMPO, EA 4542, 59313 Valenciennes, Université Lille Nord de France

## Résumé :

*Nous présentons ici les résultats expérimentaux issus de l'étude d'un écoulement avec swirl dans une conduite à section circulaire. Un swirler statique court à pales profilées est installé en début de conduite et génère un swirl décroissant dont la longueur d'influence est dépendante du nombre de Reynolds. Ce swirler est destiné à être implémenté dans les échangeurs de chaleur tubulaires, sujets à l'encrassement, en vue d'améliorer leur efficacité à faibles nombres de Reynolds. L'objectif est de déterminer précisément les transferts pariétaux en aval du swirler pour des régimes d'écoulements laminaire et turbulent ( $Re_D < 12000$ ). L'originalité de l'étude réside dans l'emploi de la méthode électrochimique, technique non-intrusive qui permet de mesurer localement le frottement pariétal instationnaire.*

## Abstract :

*We present in this communication some experimental results from the study of a swirling flow in a circular pipe. A short static swirler with profiled blades is installed at the entrance of a pipe. It induces a decaying swirl whose length of effect depends on the Reynolds number. This swirler is designed for future use in tubular heat exchangers, which are used to facing fouling problems. It is aimed to enhance their efficiency at low Reynolds number flows. The goal of this study is to accurately determine the wall transfer downstream the swirler for laminar and turbulent regime ( $Re_D < 12000$ ). The originality lies in using the electrochemical method, which is a non-intrusive technique for measuring locally the unsteady wall shear stress.*

**Mots clefs :** swirl ; conduite ; frottement pariétal instationnaire

## 1 Introduction

Un écoulement avec swirl est un écoulement pour lequel, à la direction axiale principale, se superpose une composante rotationnelle de la vitesse. L'avancement du fluide suit alors globalement, avec plus ou moins de cohérence, un motif hélicoïdal dont le pas est fixe ou variable. Ce type d'écoulement se retrouve dans de nombreuses applications, soit involontairement avec parfois des effets indésirables, soit volontairement par une tentative de contrôle pour améliorer l'écoulement selon des critères variables. Les écoulements swirlés peuvent être de types confinés ou jets libres [2]. Le type de swirl généré est choisi en fonction de l'effet recherché. Ainsi, les écoulements avec swirl peuvent par exemple augmenter la capacité de mélange, et leur utilisation est de ce fait notamment répandue dans les brûleurs [3]. Un autre effet potentiel induit par les écoulements avec swirl, et qui retient l'intérêt des auteurs de cette communication, est l'augmentation résultante du coefficient d'échange de chaleur par convection dans les tubes, et plus particulièrement dans les échangeurs de chaleur. Cette augmentation du coefficient d'échange de chaleur est rendue possible du fait de l'augmentation du frottement pariétal engendrée par le mouvement de swirl. La hausse du frottement pariétal offre également l'avantage de réduire la vitesse d'encrassement dans les échangeurs de chaleur. Les écoulements avec swirl dans les échangeurs de chaleur ont particulièrement un intérêt pour des écoulements à faibles nombres de Reynolds (écoulements laminaires) dont les performances thermiques sont faibles. Une des méthodes couramment utilisées pour induire un mouvement de swirl dans une conduite d'échangeur de chaleur est d'y insérer

des longs rubans torsadés dont la longueur est similaire à celle de la conduite [8]. Ces générateurs de swirl (qu'on appellera par la suite "swirlers") créent un écoulement avec swirl dit "constant". Ils présentent le principal inconvénient d'engendrer une trop grande augmentation des pertes de pression et de ce fait conduisent à des rendements thermohydrauliques très pauvres. Un grand nombre d'études visant à améliorer l'efficacité globale de ces swirlers ont été réalisées. La tendance principale consiste à réduire la longueur de ces swirlers et de les espacer périodiquement le long des conduites [10]. On se retrouve alors dans une configuration d'écoulement à swirl décroissant, qui se répète. D'autres géométries de swirler, mieux profilées d'un point de vue hydrodynamique ont également été étudiées [1]. Cette communication présente les premiers résultats expérimentaux visant à caractériser l'écoulement avec swirl décroissant en aval d'un swirler statique court à pales profilées, pour lequel un effort de conception a été préalablement réalisé. L'écoulement est étudié en régime laminaire et en régime turbulent à nombre de Reynolds modéré ( $Re_D < 12000$ ). L'écoulement est d'abord observé qualitativement à l'aide de visualisations par injection de colorant (e.g. [5]). La méthode électrochimique est ensuite employée pour quantifier l'augmentation induite du coefficient de frottement pariétal (e.g. [7]).

## 2 Matériel et méthodes

### 2.1 Configuration de l'étude

On utilise pour cette étude expérimentale un banc hydrodynamique dont la veine d'essais est à section circulaire de diamètre  $D = 36$  mm et de longueur  $L = 4$  m (figure 1). Le fluide s'écoule dans la veine par gravité d'un bac de charge vers un bac de stockage. Le débit est réglé par l'utilisation d'une vanne à siège incliné et par un système de trop-plein assurant une hauteur de charge constante. Une pompe centrifuge assure le retour du fluide. Les matériaux composant le banc d'essais ont été choisis pour permettre à la fois l'usage de la méthode électrochimique (matériaux chimiquement inertes et électriquement neutres) et l'utilisation de méthodes optiques de caractérisation de l'écoulement (veine transparente en PMMA).

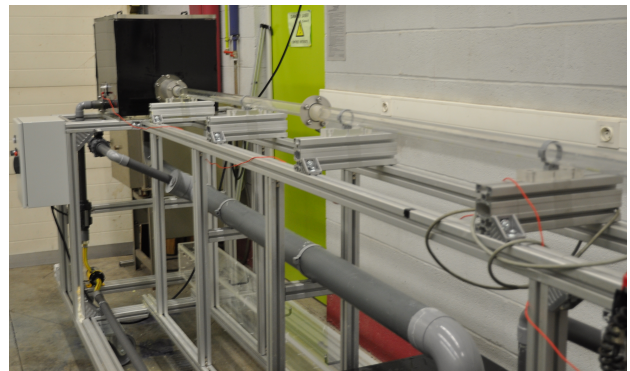
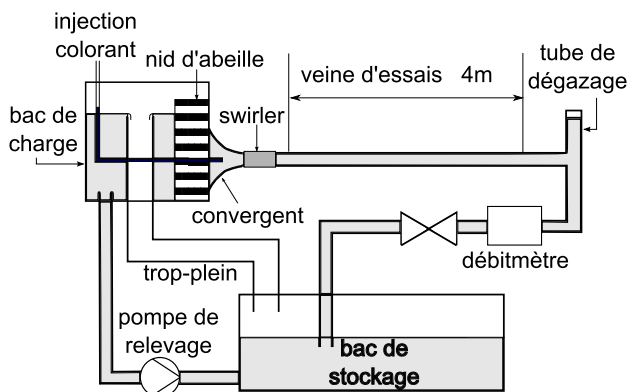


FIGURE 1 – Schéma de principe et photographie du banc d'essais.

Le swirler est placé en entrée de veine en sortie d'un convergent axisymétrique de rapport de section 1 : 8,5. Le swirler utilisé est composé de 8 pales, dont le profil présente une courbure nulle en entrée et en sortie (figure 2). L'angle de sortie des pales est constant le long du rayon. Le swirler monté sur le banc d'essais se présente sous la forme d'un module avec brides en entrée et sortie. Il a été réalisé par prototypage rapide par dépôt de fil ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène). Pour pallier tout problème d'étanchéité, un enrobage de colle PVC a été appliqué sur l'extérieur du module.

### 2.2 Méthodes de caractérisation expérimentale

Pour les visualisations, une solution aqueuse à base de bleu de méthylène a été choisie pour obtenir, sous un éclairage adéquat, un bon contraste entre le fond et les lignes de courant. Une burette fixée au-dessus du bac de charge a été utilisée pour alimenter un tube en maintenant le niveau de colorant légèrement

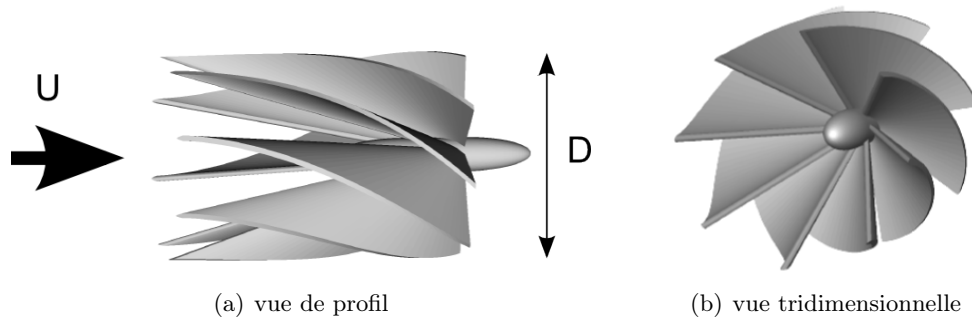


FIGURE 2 – Swirler statique à 8 pales utilisé pour cette étude.

au-dessus du niveau d'eau. Ce tube a été inséré dans une maille du nid d'abeille et se termine par un embout de diamètre réduit positionné au milieu du convergent. L'injection de colorant fonctionne alors sur la différence de pression entre le tube de la veine d'essais et l'environnement. Le colorant s'injecte quand un écoulement existe et la vitesse d'injection augmente avec celle de l'écoulement principal. Le banc hydrodynamique fonctionnant normalement en boucle fermée, et pour éviter que le colorant ne colore tout le fluide et ne diminue le contraste, la vanne de vidange du bac de stockage a dû être ouverte et de l'eau claire y a été en permanence ajoutée pour renouveler l'eau du banc. L'acquisition des images a été faite à l'aide d'une caméra rapide IMPERX Lynx® à 96 images/seconde équipée d'une optique Nikon (AF Nikkor 28 mm f/2.8D). Une règle graduée a été posée sous le tube de la veine d'essais pour permettre le réglage de l'éclairage et de la caméra, et essayer d'extraire des données quantitatives de ces résultats qualitatifs.

Le frottement pariétal a été mesuré en utilisant la méthode électrochimique (également appelée polarographique) dont une revue détaillée a été proposée par Hanratty et Campbell [4]. Cette méthode est basée sur les propriétés diffusionnelles d'un couple oxydo-réducteur, à réaction rapide, en solution aqueuse. La solution électrochimique utilisée est composée de ferricyanure de potassium et ferrocyanure de potassium (éléments actifs en concentration équimolaire de  $10 \text{ mol/m}^3$ ) et de sulfate de potassium (électrolyte neutre de concentration  $250 \text{ mol/m}^3$ ). L'application d'une tension de polarisation choisie de sorte à être en régime de diffusion contrôlée (ici  $700 \text{ mV}$ ) à une anode permet de mesurer à la micro-électrode de mesure (cathode) qui ferme la cellule polarographique un courant électrique directement lié au gradient pariétal de vitesse local et instantané. La relation entre courant et frottement pariétal est obtenue par résolution de l'équation de convection-diffusion. Pour un écoulement présentant de faibles fluctuations, et des sondes circulaires, la solution quasi-stationnaire de Lévêque donne :

$$I = 0,6672 n F C_0 d^{5/3} \mathcal{D}^{2/3} S^{1/3} \quad (1)$$

$n = 1$  est le nombre d'électrons qui entrent en jeu dans la réaction d'oxydo-réduction,  $F = 96485 \text{ C/mol}$  est la constante de Faraday,  $C_0$  est la concentration de l'espèce active,  $d$  est le diamètre de la sonde circulaire,  $\mathcal{D}$  est le coefficient de diffusion de l'espèce active (ici  $\mathcal{D} \approx 6,8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ), et  $S$  est le gradient pariétal de vitesse. Lorsque les fluctuations sont importantes ou le gradient de vitesse est faible, il est nécessaire de corriger la réponse dynamique des sondes. La technique de correction utilisée ici est basée sur une méthode intégrale approchée [11] ou sur une méthode de transfert de masse inverse lorsque cette dernière s'avère nécessaire [6, 9]. Le courant limite issu du transfert d'ions à la cathode est mesuré à l'aide de picoampèremètres Keithley®. Les sondes affleurantes utilisées sont en Nickel et

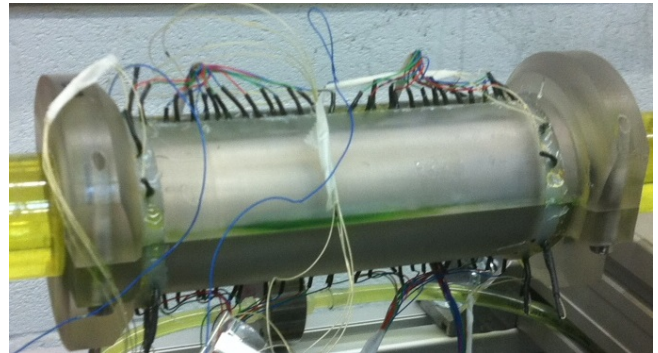


FIGURE 3 – Module de mesure polarographique.

ont un diamètre moyen de 0,5 mm. Ces sondes sont installées sur un module de mesure de 200 mm (figure 3). Elles sont placées suivant deux lignes diamétralement opposées et sont espacées de 5 mm. 8 sondes de diamètre 1 mm et 8 sondes de diamètre 2 mm sont également installées en entrée et sortie du module sur la périphérie et espacées régulièrement de 30°. Une feuille de Nickel recouvre toute la surface intérieure du module de mesure, en prévision des futurs essais de mesures de transfert de masse qui, par analogie, permet d'évaluer le transfert de chaleur. Au cours de ces prochains essais, cette feuille sera employée en tant que cathode pour mesurer le transfert global et local via les petites sondes isolées de cette dernière. Pour la mesure de frottement pariétal, cette feuille peut ne pas être connectée à la cellule polarographique et être de ce fait inerte. Elle peut également être alimentée pour servir d'anode supplémentaire, ce qui diminue le bruit de mesure. Dans cette communication, les résultats présentés proviennent d'une série de sondes consécutives positionnées en aval du swirler ( $x/D = 0$  désigne la position axiale de la sortie du swirler).

### 3 Résultats et discussion

#### 3.1 Visualisations par colorant de l'écoulement avec swirl

Les visualisations par injection de colorant permettent d'avoir un premier aperçu qualitatif du comportement de l'écoulement. Des visualisations ont été réalisées pour différents nombres de Reynolds, de  $Re_D = 900$  à  $Re_D = 12000$  (figure 4).

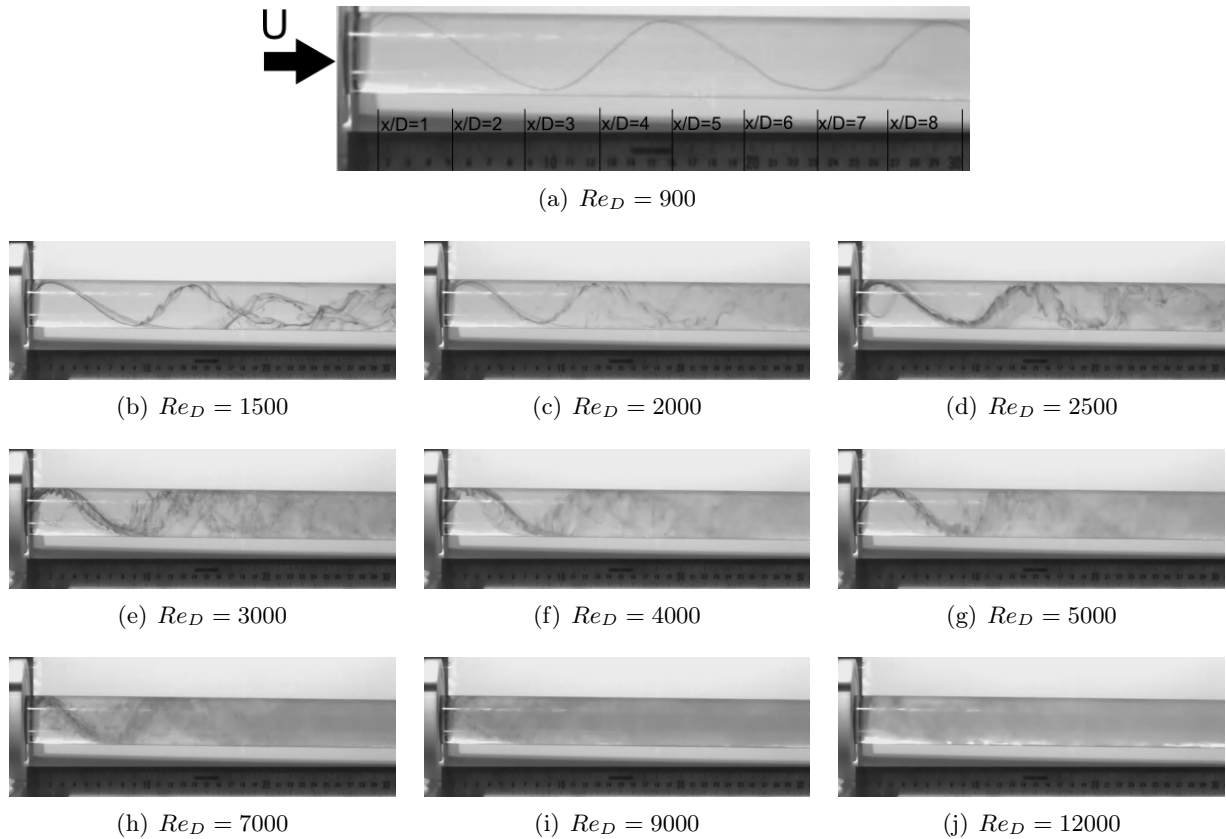


FIGURE 4 – Images extraites des vidéos de visualisation par colorant de l'écoulement avec swirl.

L'écoulement à nombre de Reynolds  $Re_D = 900$  montre la persistance du mouvement hélicoïdal typique des écoulements laminares avec swirl. Le fil de colorant est cohérent sur toute la largeur du champ visible par la caméra (jusque  $x/D \simeq 9,1$ ). La règle graduée permet d'extraire la valeur du pas hélicoïdal d'une ligne de courant proche de la paroi. Ce pas hélicoïdal est constant sur au moins deux répétitions et est estimé à  $p \simeq 3,75 \times x/D$ . Par la suite, plus le nombre de Reynolds augmente, plus le mouvement hélicoïdal semble perdre de sa cohérence. Le colorant se diffuse plus rapidement dans

l'écoulement principal. Bien que cela ne soit pas le but recherché ici, le swirler prouve sa capacité à augmenter le mélange. Malgré les fluctuations de l'écoulement de colorant rendant difficiles les interprétations, il semble que le pas hélicoïdal diminue lorsque la vitesse d'écoulement augmente et que la décroissance axiale de ce pas devienne plus importante. Par exemple, pour un écoulement à nombre de Reynolds  $Re_D = 7000$ , on peut estimer le premier demi-pas hélicoïdal visible à  $p_{1/2,1} \simeq 1,40 \times x/D$  et le deuxième demi-pas à  $p_{1/2,2} \simeq 1,10 \times x/D$ .

### 3.2 Caractérisation du frottement pariétal en aval du swirler

En vue de confirmer quantitativement la décroissance axiale observée précédemment, des mesures de frottement pariétal par méthode électrochimique ont été réalisées.

La figure 5 présente à titre d'exemple les signaux enregistrés simultanément de quatre sondes polarographiques pour les positions successives de  $x/D = 1,47$  à  $1,89$  pour un nombre de Reynolds de 1500. On peut constater sur ces signaux de fortes corrélations, remarquables sur la figure 5 pour les plages de temps au voisinage de 30s et de 90s. En particulier, on peut observer pour les signaux à  $x/D = 1,75$  et  $1,89$  un comportement en opposition quasi-réflexive. Ces similitudes soulignent une certaine cohérence induite par l'écoulement avec swirl. On remarque également à mesure que  $x/D$  augmente, une amplification des signaux du frottement pariétal qui traduit le changement de régime du laminaire au turbulent en passant par une transition.

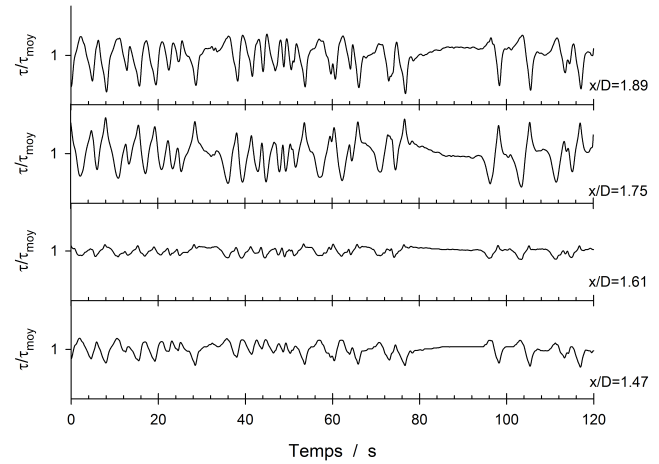


FIGURE 5 – Signaux simultanés de frottement pariétal pour  $Re_D = 1500$ .

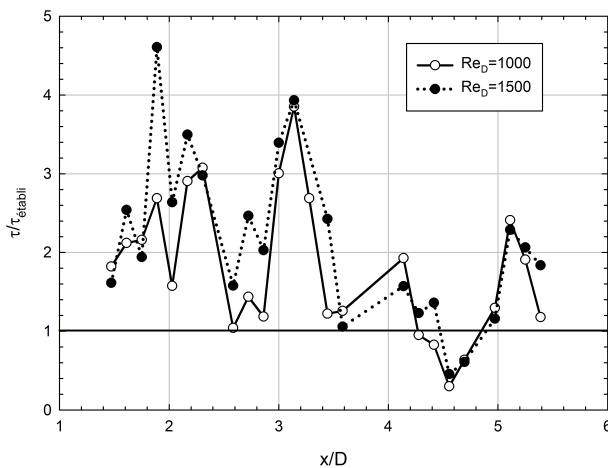


FIGURE 6 – Distribution axiale du frottement pariétal.

à la présence de pics fortement marqués. La convergence semble s'effectuer par oscillations successives autour de la valeur établie sans swirler à partir de  $x/D \approx 4,5$ . Les structures complexes pariétales induites par le swirl méritent une étude approfondie qui est poursuivie dans le cadre de ce travail.

Ces mesures de frottement pariétal ont été utilisées dans le but caractériser la décroissance axiale précédemment observée par le biais des visualisations. La figure 6 donne la distribution axiale du frottement pariétal adimensionné par les valeurs en écoulement établi pour des nombres de Reynolds de 1000 et 1500. On remarque, et cela pour les deux nombres de Reynolds, un comportement décroissant fortement fluctuant de la position  $x/D \approx 1,5$  à  $5,5$ , ce qui correspond à une atténuation progressive de l'augmentation du frottement pariétal. D'une façon générale, le frottement pariétal juste en aval du swirler est en moyenne 2 à 3 fois supérieur à sa valeur en régime établi. Le frottement pariétal axial tend asymptotiquement vers sa valeur en écoulement établi.

On remarque que cette décroissance est associée

## 4 Conclusions

Nous avons étudié qualitativement à l'aide de visualisations l'écoulement avec swirl pour différents nombres de Reynolds. Ces visualisations ont permis d'extraire la valeur quantitative du pas hélicoïdal de swirl pour un écoulement à faible nombre de Reynolds. Elles ont également pu donner un aperçu de la décroissance axiale de l'écoulement pour des nombres de Reynolds plus élevés. Cette tendance a pu être confirmée quantitativement par des mesures de frottement pariétal. Des mesures de frottement pariétal plus en aval seront nécessaires pour déterminer quantitativement la longueur d'influence du swirl. Des mesures de vitesse par méthodes optiques et des mesures de transfert de masse viendront également compléter ces travaux.

*Les auteurs tiennent à remercier l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis pour le support financier du projet FISF (Fundamentals of Internal Swirling Flows).*

## Références

- [1] Bali, T., Ayhan, T. 1999 Experimental investigation of propeller type swirl generator for a circular pipe flow. *International communications in heat and mass transfer* **26(1)** 13-22
- [2] Facciolo, L., Tillmark, N., Talamelli, A., Alfredsson, P.H. 2007 A study of swirling turbulent pipe and jet flows. *Physics of Fluids* **19(3)** :035105
- [3] Galley, D., Ducruix, S., Lacas, F., Veynante, D. 2011 Mixing and stabilization study of a partially premixed swirling flame using laser induced fluorescence. *Combustion and Flame* **158(1)** 155-171
- [4] Hanratty, T.J., Campbell, J.A. 1983 Measurement of wall shear stress. In Goldstein R.J (ed) *Fluid mechanics measurements*. Hemisphere, Washington
- [5] Ho, K., Abakr, Y.A., Chan, A. 2011 An experimental set-up for investigating swirling decaying flow in an annular pipe. *International Communications in Heat and Mass Transfer* **38(9)** 1253-1261
- [6] Keirsbulck, L., Labraga, L., Gad-el-hak, M. 2012 Statistical properties of wall-shear-stress fluctuations in turbulent channel flows. *International Journal of Heat and Fluid Flow* **37** 1-8
- [7] Legrand, J., Aouabed, H., Legentilhomme, P., Lefebvre, G., Huet, F. 1997 Use of electrochemical sensors for the determination of wall turbulence characteristics in annular swirling decaying flows. *Experimental thermal and fluid science* **15(2)** 125-136
- [8] Manglik, R.M., Bergles, A.E. 1993 Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes. i : Laminar flows. *Journal of heat transfer* **115(4)** 881-889
- [9] Maquinghen, T. 1999 Métrologie tridimensionnelle instationnaire à l'aide de la méthode polarographique. *Thèse de doctorat, Université de Valenciennes*
- [10] Saha, S.K., Dutta, A., Dhal, S.K. 2001 Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **44(22)** 4211-4223
- [11] Sobolík, V., Wein, O., Čerák, J. 1987 Simultaneous measurement of film thickness and wall shear stress in wavy flow of non-Newtonian liquids. *Collection of Czechoslovak Chemical Communication* **52** 913-928